

Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация

Оригинальная статья

УДК 630.43:630.9(470.5)

DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-105-115



МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕРСИОННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФРАКЦИЙ ФИТОМАССЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ

Хлюстов Виталий Константинович , д-р с.-х. наук, профессор,
Заслуженный лесовод России (0000-0001-8323-5750)
SPIN4645-0960, vitakhlustov@mail.ru

Ганихин Александр Максимович, аспирант (0000-0003-0671-1615)
SPIN5969-4617, ganikhin.timacad@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

Аннотация. Целью исследований явилась разработка многомерной модели конверсионных коэффициентов фракций фитомассы для сосняков района хвойно-широколиственных лесов европейской части РФ. Утвержденные нормативы представляют собой усредненные по группам возраста древостоев значения коэффициентов, относящихся к разным лесобразующим породам, произрастающим в трех природно-климатических зонах России. В отличие от упрощенного подхода определения биологической продуктивности древостоев по усредненным в группах возраста значениям конверсионных коэффициентов показан наиболее обоснованный с научной точки зрения подход, основанный на методах статистического моделирования взаимосвязей фракций фитомассы с таксационными показателями древостоев. Полученные регрессионные модели, взаимоувязанные с данными региональных таблиц хода роста различных авторов, позволили получить многомерные модели, и как следствие – наиболее точные нормативы конверсионных коэффициентов. Различия между двумя методическими подходами подтверждены на примере сосновых древостоев. Результаты оценки точности определения конверсионных коэффициентов указывают на существенное преимущество подхода, учитывающего наряду с возрастом среднюю высоту древостоев. При этом следует указать, что сам возраст, а тем более возрастная группа, которая является основой первого подхода, не в состоянии надежно характеризовать точность получения значений конверсионных коэффициентов ($R^2 = 0,908$) с ошибкой $ES = \pm 35,4\%$. Что же касается влияния средней высоты древостоев на конверсионные коэффициенты, то оно более достоверно ($R^2 = 0,990$) с ошибкой $ES = \pm 11,5\%$. Указанная точность первых двух моделей существенно уступает совместному влиянию указанных в них предикторов ($R^2 =$ от 0,998 до 0,999) с ошибкой $ES = \pm 1,76\%$ по стволам, $ES = \pm 1,34\%$ по корням, $ES = \pm 2,03\%$ по ветвям, $ES = \pm 3,7\%$ по хвое, $ES = \pm 1,19\%$ по коре.

Ключевые слова: конверсионные коэффициенты фракций фитомассы, взаимосвязь коэффициентов с возрастом и средней высотой древостоев

Формат цитирования: Хлюстов В.К., Ганихин А.М. Моделирование конверсионных коэффициентов фракций фитомассы для определения биологической продуктивности древостоев // Природообустройство. 2023. № 3. С. 105-115. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-105-115.

© Хлюстов В.К., Ганихин А.М., 2023

Original article

MODELING OF CONVERSION COEFFICIENTS OF PHYTOMASS FRACTIONS TO DETERMINE THE BIOLOGICAL PRODUCTIVITY OF STANDS

Khlyustov Vitaly Konstantinovich , doctor of agricultural sciences, professor, honored forester of Russia (0000-0001-8323-5750)

SPIN4645-0960, vitakhlustov@mail.ru

Ganikhin Alexander Maximovich, post graduate student (0000-0003-0671-1615)

SPIN5969-4617, ganikhin.timacad@mail.ru

Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya, 49. Russia

Annotation. The purpose of the research is to develop a multidimensional model of conversion coefficients of phytomass fractions for pine forests of the coniferous-deciduous forests of the European part of the Russian Federation. The approved standards are the values of the coefficients averaged over the age groups of stands related to different forest-forming species growing in the three natural and climatic zones of Russia. In contrast to the simplified approach to determining the biological productivity of stands by the values of conversion coefficients averaged in age groups, the most scientifically sound approach based on methods of statistical modeling of the relationship of phytomass fractions with inventory indicators of stands is shown. The obtained regression models, interconnected with the data of regional tables of the growth course of different authors, made it possible to obtain multidimensional models, and as a result, the most accurate standards for conversion coefficients. The differences between the two methodological approaches are confirmed by the example of pine stands. The results of assessing the accuracy of determining conversion coefficients indicate a significant advantage of an approach that takes into account, along with age, the average height of stands. At the same time, it should be pointed out that the age itself, and even more so the age group, which is the basis of the first approach, is not able to reliably characterize the accuracy of obtaining the values of conversion coefficients ($R^2 = 0.908$) with an error $ES = \pm 35.4\%$. As for the influence of the average height of stands on the conversion coefficients, it is more reliable ($R^2 = 0.990$) with an error $ES = \pm 11.5\%$. The specified accuracy of the first two models is significantly inferior to the combined influence of the predictors indicated in them ($R^2 =$ from 0.998 to 0.999) with an error $ES = \pm 1.76\%$ for trunks, $ES = \pm 1.34\%$ for roots, $ES = \pm 2.03\%$ for branches, $ES = \pm 3.7\%$ for needles, $ES = \pm 1.19\%$ for bark.

Keywords: conversion coefficients of phytomass fractions, relationship of the coefficients with the age and average height of the stands

Format of citation: Khlyustov V.K., Ganikhin A.M. Modeling of conversion coefficients of phytomass fractions to determine the biological productivity of stands. // Prirodoobustroystvo. 2023. № .3. P. 105-115. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-105-115.

Введение. Представители Российского союза промышленников и предпринимателей ставят вопрос о том, чтобы узаконить учет поглощения углерода лесами и другими экосистемами в качестве компенсации за промышленные выбросы. Д.Г. Замоладчиковым и др. [1] отмечается, что значимость лесов в контексте глобального изменения климата на планете невозможно переоценить. Ценность лесов отмечена как Киотским протоколом, так и Рамочной конвенцией ООН об изменении климата. Эта ценность заключается прежде всего в способности лесов накапливать углерод как в фитомассе, так и в остальных слагающих компонентах лесных экосистем. В работе авторов рассматривается оценка объемов и потоков углерода в лесах на региональном уровне, а также базовые подходы к методическим решениям указанной проблемы. Выделено 4 базовых

подхода: конверсионный, модельный, дистанционный и картографический. Предпочтение среди них авторы отдают конверсионному подходу, основанному на отношении

$$k = \frac{Ph}{M}, \quad (1)$$

где k – конверсионный коэффициент; Ph – фитомасса, т га⁻¹; M – запас, м³/га.

Приверженцами модельного подхода являются В.А. Усольцев [2], А.З. Швиденко и др. [3], Ю.П. Демаков [4, 5], В.К. Хлюстов [6] и др. Основой моделей биологической продуктивности древостоев В.А. Усольцева [2], А.З. Швиденко [3] являются таблицы хода роста по классам бонитета, разработанные разными авторами по регионам Северной Евразии, в которые добавлены данные о биомассе фракций фитомассы (т*га⁻¹) стволовой

древесины, коры, ветвей, листвы/хвои. В отличие от указанных таблиц, разработанных по бонитетам В.К. Хлюстовым, разработаны таблицы биологической продуктивности хода роста по лесотипологическим классам средних высот [6]. Таблицы существенно расширены добавлением динамики строения древостоев по толщине деревьев. Дополнительно показано распределение указанных фракций фитомассы по классам толщины деревьев.

Существенное расширение сведений о структуре биологической продуктивности привело к необходимости разработки информационно-справочных систем лесотаксационных нормативов (ИССЛТН), которые позволяют обеспечить цифровизацию древесных ресурсов с учетом экологических условий произрастания насаждений по лесотипологическим классам средних высот [7]. Формы и содержание новых нормативов в табличной форме и в графической интерпретации подробно изложены автором данной статьи [6].

Наполнение ИССЛТН аналитической информацией о биологической продуктивности требует получить многомерные модели конверсионных коэффициентов как переходного элемента от наличного запаса древостоев, определяемого как наземными, так и дистанционными методами.

Цель исследований: разработка модели конверсионных коэффициентов фракций фитомассы для сосняков Центрального федерального округа.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Дать статистическую оценку точности действующих нормативов конверсионных

коэффициентов, усредненных по группам возраста отдельных фракций фитомассы (по Д.Г. Замолдчикову и др.) [1].

2. Произвести оценку точности взаимосвязи конверсионных коэффициентов совокупности фракций фитомассы отдельно с возрастом и отдельно со средней высотой древостоев.

3. Построить регрессионную модель и оценить точность взаимосвязи конверсионных коэффициентов фракций фитомассы с возрастом и средней высотой древостоев.

Материалы и методы исследований.

Оценка точности взаимосвязи конверсионных коэффициентов разных фракций фитомассы отдельно с возрастом, а также со средней высотой осуществлена построением уравнений регрессий, включающих в себя бинарные переменные, кодирующие фракции фитомассы согласно методическим указаниям [8]. Точность моделей характеризуется показателями детерминации (R^2) и относительными ошибками уравнений ($\pm ES$, %). Достоверность соответствия теоретически полученных результатов по моделям фактическим данным представлена в виде квадрата оценки адекватности.

Действующие нормативы конверсионных коэффициентов фракций фитомассы. Достоверность нормативов биологической продуктивности древостоев связана с точностью определения конверсионных коэффициентов фракций фитомассы. Такая необходимость вызвана прежде всего большими значениями погрешностей, которые приводятся авторами (табл. 1).

Точность определения средних величин коэффициентов конверсии колеблется от 1,3 до 26,3% (выделено красным цветом), что в итоге призывает задуматься об использовании данных

Таблица 1. Конверсионные коэффициенты фракций фитомассы для сосновых древостоев разных широтных зон России по группам возраста по Замолдчикову и др. [1]

Table 1. Conversion coefficients of phytomass fractions for pine stands of different latitudinal zones of Russia by age groups according to Zamolodchikov et al. [1]

Широтная полоса	Группа возраста	Стволы			Ветви			Корни			Хвоя		
		K_{CP}	$\pm m_{KCP}$	$\pm P, \%$	K_{CP}	$\pm m_{KCP}$	$\pm P, \%$	K_{CP}	$\pm m_{KCP}$	$\pm P, \%$	K_{CP}	$\pm m_{KCP}$	$\pm P, \%$
1	Молодняки	0,469	0,021	4,5	0,128	0,022	17,2	0,174	0,031	17,8	0,167	0,044	26,3
	Средневозрастные	0,468	0,01	2,1	0,052	0,002	3,8	0,143	0,009	6,3	0,03	0,002	6,7
	Приспевающие	0,482	0,016	3,3	0,067	0,01	14,9	0,155	0,016	10,3	0,033	0,005	15,2
	Спелые и перестойные	0,462	0,008	1,7	0,057	0,006	10,5	0,121	0,008	6,6	0,021	0,002	9,5
2	Молодняки	0,47	0,027	5,7	0,131	0,026	19,8	0,108	0,013	12,0	0,084	0,014	16,7
	Средневозрастные	0,455	0,006	1,3	0,062	0,006	9,7	0,101	0,004	4,0	0,028	0,002	7,1
	Приспевающие	0,475	0,01	2,1	0,054	0,006	11,1	0,162	0,033	20,4	0,024	0,004	16,7
	Спелые и перестойные	0,478	0,014	2,9	0,054	0,005	9,3	0,088	0,004	4,5	0,027	0,004	14,8
3	Молодняки	0,444	0,008	1,8	0,112	0,007	6,3	0,19	0,019	10,0	0,123	0,012	9,8
	Средневозрастные	0,447	0,008	1,8	0,066	0,003	4,5	0,159	0,014	8,8	0,032	0,002	6,3
	Приспевающие	0,453	0,01	2,2	0,052	0,002	3,8	0,128	0,007	5,5	0,026	0,002	7,7
	Спелые и перестойные	0,491	0,011	2,2	0,059	0,004	6,8	0,137	0,007	5,1	0,025	0,002	8,0

коэффициентов при пересчете биомассы древостоев по действующей методике. Более того, признать значения коэффициентов по группам возраста и широтной полосе в виде однородной выборочной совокупности объектов, на наш взгляд, сомнительно, так как какие-либо сведения о сформированной генеральной совокупности авторами не приведены. Следует особо указать на то, что наиболее значимое влияние на продуктивность древостоев оказывает не возраст древостоев, а физические параметры: средняя высота, сомкнутость крон деревьев и доля лесобразующих пород в формуле состава древостоев. Именно эти три показателя функционально определяют величину запаса (M , $m^3/га$), который включен в формулу (1), по которой рассчитывается величина конверсионного коэффициента.

Следующим аргументом, демонстрирующим несовершенство утвержденных нормативов, является использование усредненных коэффициентов конверсии (значения коэффициентов взяты

для 3 широтной полосы (табл. 1) при их перемножении (табл. 2) с запасом. Итоговый результат показывает, что для каждого класса бонитета при использовании усредненных коэффициентов по Д.Г. Замолотчикову и др. биомасса фракций будет одинаковой для каждого класса бонитета при одинаковом запасе древостоев (табл. 4, графы 4, 5, 6), а это не соответствует действительности. Для оценки достоверности теории расчета коэффициентов конверсии с учетом возраста и средней высоты использованы данные таблицы биологической продуктивности В.А. Усольцева [2], увязанной с таблицами хода роста В.В. Загребеева [9] (табл. 3).

Сравнение результатов расчета биомассы при использовании усредненных коэффициентов по Д.Г. Замолотчикову и др. с данными таблиц В.А. Усольцева, В.В. Загребеева подтверждает достоверность влияния средней высоты древостоев, опосредованно выраженное через их запас на 1 га по классам бонитета (табл. 4). В таблице

Таблица 2. Условные значения запасов на 1 га по группам возраста и классам бонитета для расчета биологической продуктивности при разных методиках ее определения

Table 2. Conditional values of stocks per 1 ha per age groups and classes of bonitet to calculate biological productivity under different methods of its determination

Показатель <i>Indicators</i>	Группа возраста <i>Age group</i>	Класс бонитета / <i>Bonitet class</i>		
		I ^a	III	V
Запас, куб.м/га <i>Stock, cubic meters / ha</i>	Молодняки / <i>Youngsters</i>	60	60	60
	Средневозрастные / <i>Middle-aged</i>	100	100	100
	Приспевающие / <i>Ripening</i>	150	150	150
	Спелые / <i>Ripe</i>	200	200	200

Таблица 3. Результаты расчета биомассы при использовании конверсионных коэффициентов, полученных по данным таблиц В.В. Загребеева [9], В.А. Усольцева [2]

Table 3. Result of biomass calculation at using conversion coefficients obtained according to the data of tables V.V. Zagreeva [9], V.A. Usoltseva [2]

Показатель <i>Indicator</i>	Группа возраста <i>Age group</i>	Фракция фитомассы <i>Phytomass fraction</i>	Ia бонитет <i>Ia Bonitet</i>		III бонитет <i>III bonitet</i>		V бонитет <i>V bonitet</i>	
Биомасса, т/га <i>Biomasse, t / ha</i>	Молодняки (10-40) <i>Youngsters (10-40)</i>	Стволы / <i>Trunks</i>	25,26	25,50	26,10	26,30	26,88	27,00
		Ветви / <i>Branches</i>	7,88	2,74	10,50	3,78	8,88	5,56
		Хвоя / <i>Needles</i>	7,26	1,13	12,81	2,01	9,36	3,65
		Корни / <i>Roots</i>	8,25	7,10	10,50	9,16	13,92	12,26
	Средневозрастные <i>Middle-aged</i>	Стволы / <i>Trunks</i>	42,89	43,31	44,11	44,44	45,17	45,51
		Ветви / <i>Branches</i>	4,03	3,80	6,04	3,80	5,30	4,87
		Хвоя / <i>Needles</i>	1,31	1,07	2,19	1,71	3,68	2,76
		Корни / <i>Roots</i>	11,66	11,63	14,58	14,25	18,62	17,82
	Приспевающие (100-120) <i>Ripening (100-120)</i>	Стволы / <i>Trunks</i>	65,55	66,08	67,18	67,69	68,71	69,17
		Ветви / <i>Branches</i>	5,59	5,52	7,01	6,88	9,11	8,88
		Хвоя / <i>Needles</i>	1,42	1,29	2,20	1,99	3,48	3,10
		Корни / <i>Roots</i>	17,52	17,57	21,21	21,15	26,29	26,07
	Спелые и перестойные (140-160) <i>Ripe and overripe</i>	Стволы / <i>Trunks</i>	88,75	89,35	90,85	91,38	92,83	93,31
		Ветви / <i>Branches</i>	7,3	7,3	9,1	8,9	11,5	11,3
		Хвоя / <i>Needles</i>	1,6	1,5	2,5	2,3	3,8	3,5
		Корни / <i>Roots</i>	23,5	23,5	28,1	28,0	34,4	34,2

указаны предельные значения биомассы (графы 7, 8), в которые укладываются значения биомассы, рассчитанные через усредненные конверсионные коэффициенты (графы 4, 5, 6).

Оценка влияния на конверсионные коэффициенты фракций фитомассы возраста древостоев. Оценить достоверность влияния на конверсионные коэффициенты фракций фитомассы возраста позволила модель, построенная на сочетании фиктивных блоковых переменных (табл. 5) с возрастом общего вида:

$$K_{\phi} = \exp(a_0 + a_1 \ln A + a_2 \ln^2 A + \ln A(a_3 X_1 + a_4 X_2 + a_5 X_3 + a_6 X_4) + \ln^2 A(a_7 X_1 + a_8 X_2 + a_9 X_3 + a_{10} X_4)). \quad (2)$$

После проведения регрессионного анализа данных параметры уравнения получили

конкретные значения, представленные в таблице 6.

Результат моделирования представлен квадратом оценки адекватности (рис. 1, верхний слева). Стандартная ошибка уравнения регрессии составляет $\pm 35,5\%$, что указывает на низкую точность модели. Степень отклонения теоретических значений коэффициентов от фактических независимо от фракций фитомассы показывает их соответствие в 96,9% случаев ($R^2 = 0,969$). Оценка соответствия теоретических значений K_{ϕ} фактических по отдельным фракциям фитомассы значительно ниже (рис. 1, верхний справа). Так, для стволов деревьев $R^2 = 0,248$; для корней $R^2 = 0,006$; для хвои $R^2 = 0,706$; для коры $R^2 = 0,436$. Судя по параметрам коэффициентов детерминации (R^2) уравнений, влияние возраста на K_{ϕ} является либо несущественным (для

Таблица 4. Сравнение результатов расчета биомассы при использовании усредненных коэффициентов по Д.Г. Замолотчикову и др. [1] (полужирный) и расчетных коэффициентов по В.В. Загребеву [9], В.А. Усольцеву [2] (полужирный наклонный)

Table 4. Comparison of the results of biomass calculation using the averaged coefficients according to D.G. Zamolodchikov et al. [1] (*bold*) and the calculated coefficients according to V.V. Zagreev [9], V.A. Usoltsev [2] (*bold oblique*)

Показатель <i>Indicator</i>	Группа возраста <i>Age group</i>	Фракция фитомассы <i>Phytomass fraction</i>	Класс бонитета <i>Class of bonitet</i>			Пределы, т/га I ^a -V бонитеты <i>Limits, t / ha I^a-V bonites</i>		Примечание <i>Note</i>
			I ^a	III	V			
						min	max	
Биомасса, т/га <i>Biomasse, t / ha</i>	Молодняки (10-40) <i>Youngsters</i>	Стволы / <i>Trunks</i>	26,64	26,64	26,64	25,50	27,00	Укладывается / <i>Within values</i>
		Ветви / <i>Branches</i>	6,72	6,72	6,72	2,74	10,50	Укладывается / <i>Within values</i>
		Хвоя / <i>Needles</i>	7,92	7,92	7,92	1,13	9,36	Укладывается / <i>Within values</i>
		Корни / <i>Roots</i>	11,40	11,40	11,40	7,10	13,92	Укладывается / <i>Within values</i>
	Средневозрастные (60-80) <i>Middle-aged</i>	Стволы / <i>Trunks</i>	44,70	44,70	44,70	42,89	45,51	Укладывается / <i>Within values</i>
		Ветви / <i>Branches</i>	6,60	6,60	6,60	3,80	6,04	Превышает / <i>Exceeds</i>
		Хвоя / <i>Needles</i>	3,20	3,20	3,20	1,07	3,68	Укладывается / <i>Within values</i>
		Корни / <i>Roots</i>	15,90	15,90	15,90	11,63	18,62	Укладывается / <i>Within values</i>
	Приспевающие (100-120) <i>Ripening</i>	Стволы / <i>Trunks</i>	67,95	67,95	67,95	65,55	69,17	Укладывается / <i>Within values</i>
		Ветви / <i>Branches</i>	7,80	7,80	7,80	5,52	9,11	Укладывается / <i>Within values</i>
		Хвоя / <i>Needles</i>	3,90	3,90	3,90	1,29	3,48	Укладывается / <i>Within values</i>
		Корни / <i>Roots</i>	19,20	19,20	19,20	17,52	26,29	Укладывается / <i>Within values</i>
	Спелые и перестойные (140-160) <i>Ripe and overripped</i>	Стволы / <i>Trunks</i>	98,20	98,20	98,20	88,75	93,31	Превышает / <i>Exceeds</i>
		Ветви / <i>Branches</i>	10,20	10,20	10,20	7,30	11,50	Укладывается / <i>Within values</i>
		Хвоя / <i>Needles</i>	5,00	5,00	5,00	1,60	3,80	Превышает / <i>Exceeds</i>
		Корни / <i>Roots</i>	27,40	27,40	27,40	23,50	34,40	Укладывается / <i>Within values</i>

Таблица 5. Кодирование фракций фитомассы блоковыми фиктивными переменными

Table 5. Coding of phytomass fractions by block dummy variables

Фракция фитомассы <i>Phytomass fraction</i>	Фиктивные блоковые переменные / <i>Block dummy variables</i>			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
Ветви / <i>Branches</i>	0	0	0	0
Кора / <i>Bark</i>	1	0	0	0
Корни / <i>Roots</i>	0	1	0	0
Стволы / <i>Trunks</i>	0	0	1	0
Хвоя / <i>Needles</i>	0	0	0	1

корней – 0,6%), либо слабым (для стволов и коры – 24,8-43,6%), и лишь для хвои – средним по значимости (70,6%).

В итоге полученные результаты моделирования влияния на конверсионные коэффициенты фракций фитомассы возраста следует считать неудовлетворительными.

Оценка влияния на конверсионные коэффициенты фракций фитомассы средней высоты древостоев. Оценить достоверность влияние на конверсионные коэффициенты фракций фитомассы средней высоты древостоев позволила модель (3), построенная на сочетании фиктивных блоковых переменных (табл. 7) со средней высотой древостоев общего вида:

$$\begin{aligned} K_{\Phi} = & \exp(a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln^2 H + \\ & + \ln H(a_3 X_1 + a_4 X_2 + a_5 X_3 + a_6 X_4) + \\ & + \ln^2 H(a_7 X_1 + a_8 X_2 + a_9 X_3 + a_{10} X_4)). \end{aligned} \quad (3)$$

Результат полученной модели (3) отображен квадратом оценки адекватности (рис. 1, нижний слева). Стандартная ошибка уравнения регрессии составляет $\pm 11,5\%$, что указывает на более высокую значимость влияния на конверсионные коэффициенты средней высоты, чем возраста древостоев. Степень отклонения теоретических значений коэффициентов от фактических независимо от фракций фитомассы показывает соответствие в 99,0% случаев ($R^2 = 0,990$).

Оценка соответствия теоретических значений K_{Φ} фактическим по отдельным фракциям фитомассы значительно ниже объединенных значений (рис. 1, нижний справа): для стволов деревьев $R^2 = 0,047$; для ветвей $R^2 = 0,980$; для корней $R^2 = 0,497$; для хвои $R^2 = 0,919$; для коры $R^2 = 0,436$. Судя по параметрам коэффициентов детерминации (R^2) уравнений, влияние средней высоты на K_{Φ} является либо несущественным (для стволов – 0,4%), либо слабым (для коры и корней – 43,6-49,7%), и лишь для хвои и ветвей – высоким по значимости (91,9-98,0%).

Полученные результаты моделирования влияния на конверсионные коэффициенты фракций фитомассы средней высоты следует считать более точными, чем результаты по влиянию возраста. Существенное различие в конверсионных коэффициентах, полученных описанными способами, указывает на целесообразность применения многомерных методов моделирования, включающих в себя совместное влияние возраста и средней высоты древостоев, которые отражают все уровни продуктивности древостоев.

В.А. Усольцев [2], как отмечалось выше, указывает, что для разработки таблицы конверсионных коэффициентов Д.Г. Замолотчиковым и др. [1] в качестве факториального признака был использован лишь возраст древостоев, в то время как сам автор рекомендует включать в модель конверсионных коэффициентов такие

Таблица 6. Статистические параметры модели (2)

Table 6. Statistical parameters of the model (2)

Численные коэффициенты/значимость коэффициентов по t / Numerical coefficients / significance of coefficients by t							
a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
−1,06944	−0,40928	—	−0,35521	—	0,47014	—	0,05678
9,6	14,4	—	4,5	—	34,9	—	3,2
Численные коэффициенты/значимость коэффициентов по t Numerical coefficients / significance of coefficients by t					R ²		Es, %
a ₈		a ₉		a ₁₀			
0,05022		—		−0,05039		0,907	± 35,5
16,9		—		16,9			

Таблица 7. Статистические параметры модели (3)

Table 7. Statistical parameters of the model (3)

Численные коэффициенты/значимость коэффициентов по t / Numerical coefficients / significance of coefficients by t							
a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
−1,09719	−0,76421	0,03970	−0,34846	0,46972	1,01888	—	0,06562
16,1	12,8	3,2	10,9	14,7	32,0	—	6,2
Численные коэффициенты/значимость коэффициентов по t Numerical coefficients / significance of coefficients by t					R ²		Es, %
a ₈		a ₉		a ₁₀			
−0,03903		−0,09084		−0,12053		0,990	± 11,5
3,7		8,6		53,1			

предикторы, как средний возраст, среднюю высоту, средний диаметр и число стволов. Моделирование конверсионных коэффициентов в обязательном порядке должно быть выполнено с использованием многомерных регрессий, включающих в себя возраст и среднюю высоту древостоев.

Оценка влияния на конверсионные коэффициенты фракций фитомассы возраста и средней высоты древостоев. Для исследования взаимосвязи конверсионных коэффициентов с возрастом и средней высотой древостоев рассмотрим построение модели, включающей в себя в качестве предикторов закодированные бинарными переменными значения возраста по 20-летиям древостоев (по классам возраста) (табл. 8) и численные значения средней высоты древостоев.

В общем виде модели конверсионных коэффициентов представлены следующим образом:

для стволовой древесины в коре и корней

$$\begin{aligned} K_c, K_{\text{корн}} = & \exp(a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln^2 H + \\ & + \ln H(a_3 X_1 + a_4 X_2 + a_5 X_3 + a_6 X_4 + a_7 X_5 + \\ & + a_8 X_6 + a_9 X_7 + a_{10} X_8) + \ln^2 H(a_{11} X_1 + a_{12} X_2 + \\ & + a_{13} X_3 + a_{14} X_4 + a_{15} X_5 + a_{16} X_6 + a_{17} X_7 + a_{18} X_8)); \end{aligned} \quad (4)$$

для ветвей, хвои, коры деревьев

$$\begin{aligned} K_v, K_{\text{коры}} = & \exp(a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln^2 H + \\ & + \ln H(a_3 X_1 + a_4 X_2 + a_5 X_3 + a_6 X_4 + \\ & + a_7 X_5 + a_8 X_6 + a_9 X_7 + a_{10} X_8)). \end{aligned} \quad (5)$$

В результате моделирования конверсионных коэффициентов по фракциям фитомассы определены значения численных коэффициентов уравнения, значения критериев, подтверждающих статистическую достоверность моделей и их предикторов. Характеристики точности моделей представлены коэффициентами детерминации, стандартными ошибками и критериями Дарбина-Уотсона по фракциям фитомассы (выделены полужирным прифтом) (табл. 9).

Для подтверждения соответствия расчетных значений по модели фактическим данным приведены оценки адекватности модели для каждой фракции фитомассы (рис. 2).

Анализ содержания рисунков позволяет сделать вывод о достаточно высокой степени соответствия теоретических значений конверсионных коэффициентов фактическим значениям. Степень соответствия коэффициентов колеблется

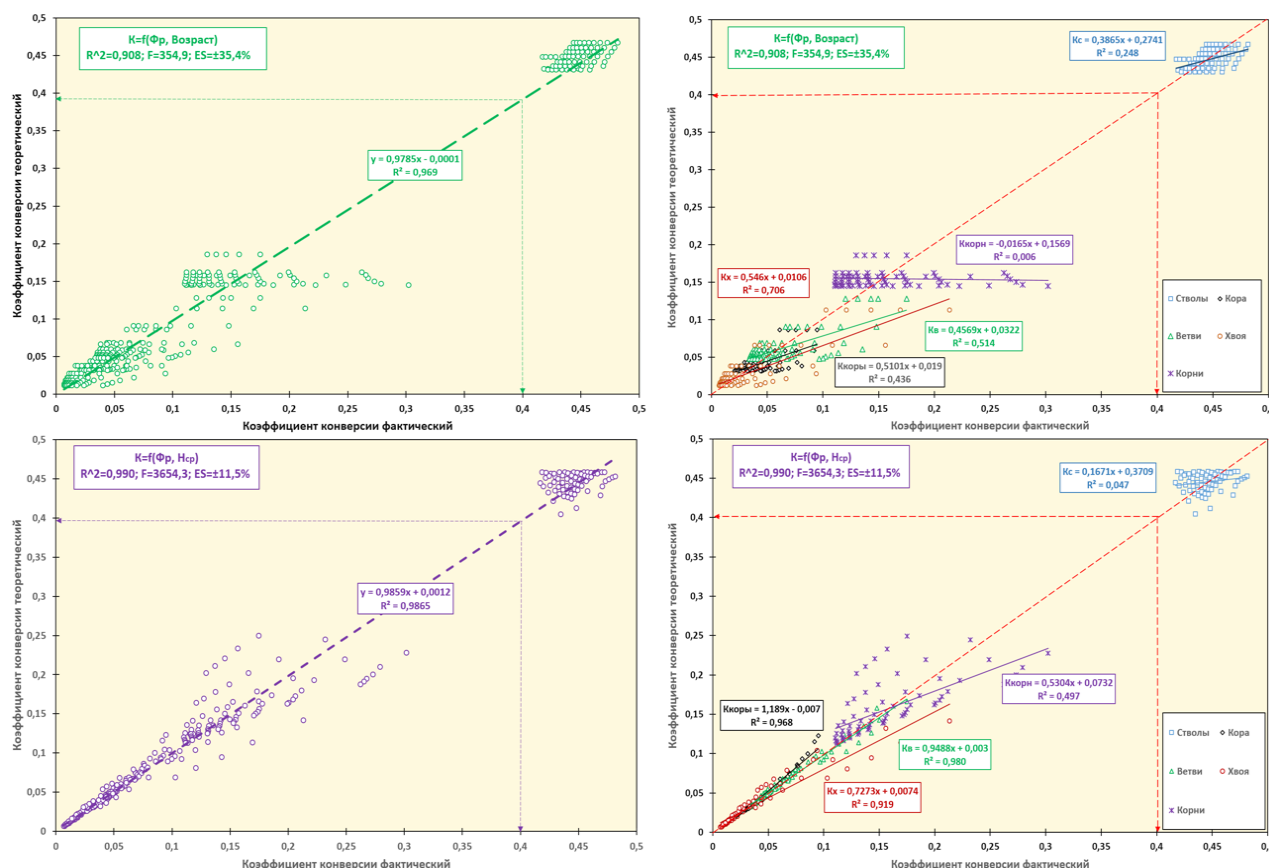


Рис. 1. Квадрат оценки адекватности (соответствия) теоретически полученных по моделям: (2) сверху, (3) снизу – конверсионных коэффициентов фактическим значениям

Fig. 1. The square of the assessment of the adequacy (compliance) of the conversion coefficients theoretically obtained by models (2) – from above and (3) – from below to the actual values (5)

от 0,991, относящейся к хвое, до 0,998, относящейся к стволам и корням.

Для демонстрации диапазонов работы моделей конверсионных коэффициентов на рисунке 3 представлены линии регрессии, демонстрирующие изменения конверсионных коэффициентов от средней высоты по 20-летиям для отдельных фракций фитомассы. Линии регрессии максимально приурочены к группам возраста с указанием предельных значений коэффициентов, показанных стрелками, выделенными цветом, соответствующим линии регрессии.

Таблица 8. Кодирование бинарными переменными
возраста древостоев по 20-летиям

Table 8. Coding by binary variables for the stands age
on 20 years periods

Возраст, лет	Блочные фиктивные переменные							
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈
10	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1	0	0	0	0	0	0	0
40	0	1	0	0	0	0	0	0
60	0	0	1	0	0	0	0	0
80	0	0	0	1	0	0	0	0
100	0	0	0	0	1	0	0	0
120	0	0	0	0	0	1	0	0
140	0	0	0	0	0	0	1	0
160	0	0	0	0	0	0	0	1

На завершающем этапе работы проведем сравнение усредненных по группам возраста конверсионных коэффициентов, представленных в таблице 1, с данными, полученными по моделям (4), (5), с параметрами, представленными в таблице 9. Так, изменение конверсионных коэффициентов биомассы стволов в зависимости от средней высоты в группе возраста молодняки, охватившие возраст от 10 до 40 лет, имеет предельные значения от 0,42 до 0,46 при усредненном значении 0,444. В процентном отношении отклонение от средней составляет от -5,4 до 3,6%.

В группе возраста средневозрастные, имеющие 60-80 лет, предельные значения коэффициентов колеблются от 0,43 до 0,47 при усредненном значении 0,447. В процентном отношении отклонение от средней составляет от -3,8 до 5,1%. В группе возраста приспевающие древостои (100 лет) предельные значения охватывают диапазон коэффициентов от 0,43 до 0,47 при усредненном значении 0,453. В процентном отношении отклонение от средней

Таблица 9. Параметры моделей конверсионных коэффициентов по фракциям фитомассы

Table 9. Parameters of models of conversion coefficients by phytomass fractions

Фракция	Параметры уравнения											
Стволы в коре	Предикторы	a_0	$\ln H$	$\ln^2 H$	$\ln HX_1$	$\ln HX_2$	$\ln HX_3$	$\ln HX_4$	$\ln HX_5$	$\ln HX_6$	$\ln HX_7$	$\ln HX_8$
	Коэффициенты ур.	-0,73160	-0,13470	0,03070	0,06495	0,10833	0,12380	0,13465	0,14162	0,14852	0,15365	0,15769
	Значимость a_i по t	177,4	18,4	9,2	15,3	23,3	26,4	27,6	28,4	29,4	30,1	30,7
	Предикторы	$\ln^2 HX_1$	$\ln^2 HX_2$	$\ln^2 HX_3$	$\ln^2 HX_4$	$\ln^2 HX_5$	$\ln^2 HX_6$	$\ln^2 HX_7$	$\ln^2 HX_8$	Характеристики точности		
	Коэффициенты ур.	-0,02475	-0,03594	-0,03828	-0,03984	-0,04061	-0,04165	-0,04231	-0,04278	R ²	SE, %	ДУ
	Значимость a_i по t	9,2	12,5	13,2	13,4	13,5	13,8	14,0	14,1	0,998	±1,76	1,390
Корни	Предикторы	a_0	$\ln H$	$\ln^2 H$	$\ln HX_1$	$\ln HX_2$	$\ln HX_3$	$\ln HX_4$	$\ln HX_5$	$\ln HX_6$	$\ln HX_7$	$\ln HX_8$
	Коэффициенты ур.	-0,44032	-1,78274	0,50400	0,68423	1,05357	1,16301	1,22497	1,26410	1,28336	1,29633	1,31246
	Значимость a_i по t	12,1	28,0	17,2	17,9	25,7	28,2	28,6	28,9	29,0	29,1	29,2
	Предикторы	$\ln^2 HX_1$	$\ln^2 HX_2$	$\ln^2 HX_3$	$\ln^2 HX_4$	$\ln^2 HX_5$	$\ln^2 HX_6$	$\ln^2 HX_7$	$\ln^2 HX_8$	Характеристики точности		
	Коэффициенты ур.	-0,33060	-0,45070	-0,47563	-0,48857	-0,49626	-0,49908	-0,50104	-0,50477	R ²	SE, %	ДУ
	Значимость a_i по t	13,6	17,7	18,6	18,7	18,8	18,8	18,9	18,9	0,997	±1,34	1,380
Ветви	Предикторы	a_0	$\ln H$	$\ln^2 H$	$\ln HX_1$	$\ln HX_2$	$\ln HX_3$	$\ln HX_4$	$\ln HX_5$	$\ln HX_6$	$\ln HX_7$	$\ln HX_8$
	Коэффициенты ур.	-1,25289	-0,50120	-	-0,10824	-0,12005	-0,10778	-0,09737	-0,08654	-0,07986	-0,0758	-0,07370
	Значимость a_i по t	100,3	44,8	-	12,7	14,1	12,6	11,2	9,9	9,1	8,6	8,4
	Характеристики точности	R ²	SE, %	ДУ	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,998	±2,03	1,290	-	-	-	-	-	-	-	-
Хвоя	Предикторы	a_0	$\ln H$	$\ln^2 H$	$\ln HX_1$	$\ln HX_2$	$\ln HX_3$	$\ln HX_4$	$\ln HX_5$	$\ln HX_6$	$\ln HX_7$	$\ln HX_8$
	Коэффициенты ур.	-1,02540	-0,66492	-	-0,22466	-0,32504	-0,35619	-0,37404	-0,38366	-0,39270	-0,40108	-0,40846
	Значимость a_i по t	44,8	32,5	-	14,3	20,8	22,7	23,6	24,1	24,5	25,0	25,4
	Характеристики точности	R ²	SE, %	ДУ	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,998	±3,70	1,129	-	-	-	-	-	-	-	-
Кора стволов деревьев	Предикторы	a_0	$\ln H$	$\ln^2 H$	$\ln HX_1$	$\ln HX_2$	$\ln HX_3$	$\ln HX_4$	$\ln HX_5$	$\ln HX_6$	$\ln HX_7$	$\ln HX_8$
	Коэффициенты ур.	-1,85357	-0,49216	-0,02183	0,01299	0,02039	0,02269	0,02585	0,02706	0,02864	0,03007	0,03129
	Значимость a_i по t	95,5	26,7	6,9	2,5	3,8	4,3	4,9	5,1	5,4	5,7	5,9
	Характеристики точности	R ²	SE, %	ДУ	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,999	±1,19	1,355	-	-	-	-	-	-	-	-

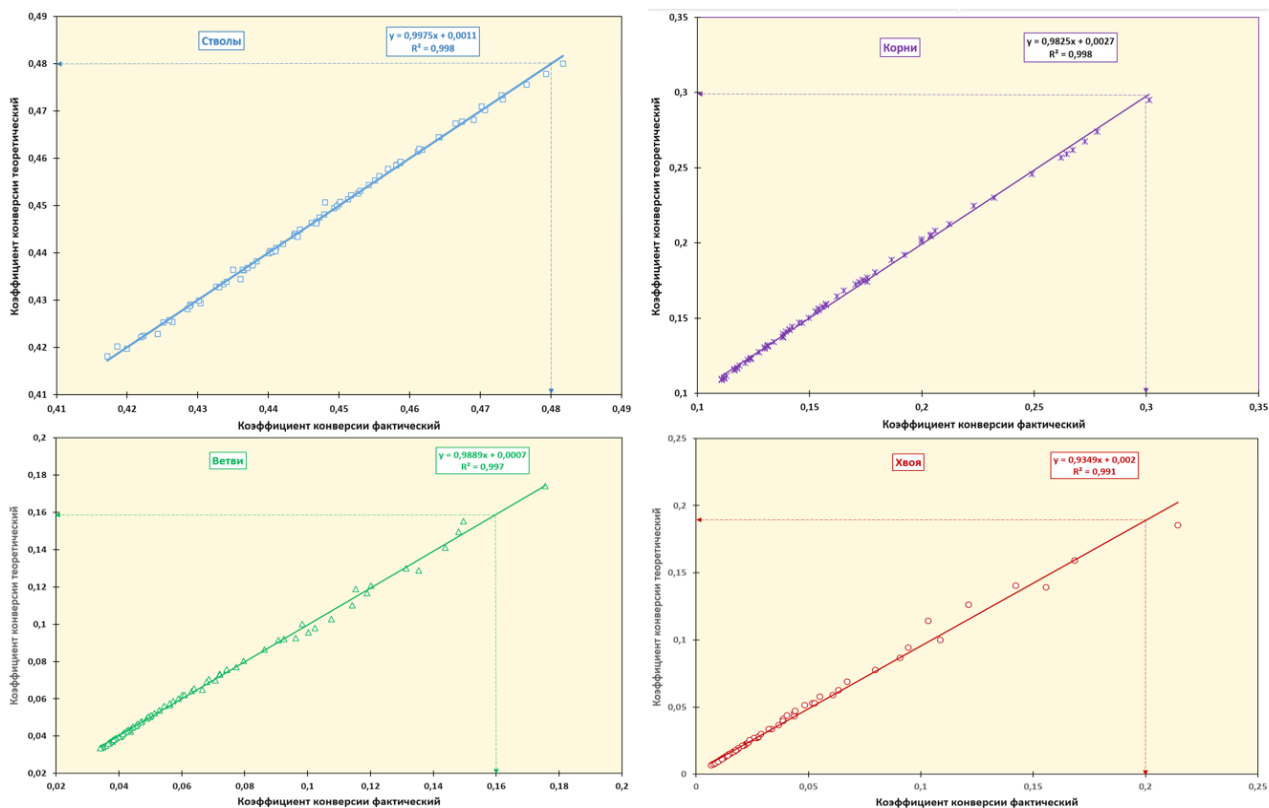


Рис. 2. Квадрат оценки адекватности (соответствия) теоретически полученных по моделям (4) и (5) конверсионных коэффициентов фактическим значениям
Fig. 2. The square of the assessment of the adequacy (compliance) of the conversion coefficients theoretically obtained by models (4) and (5) to the actual values

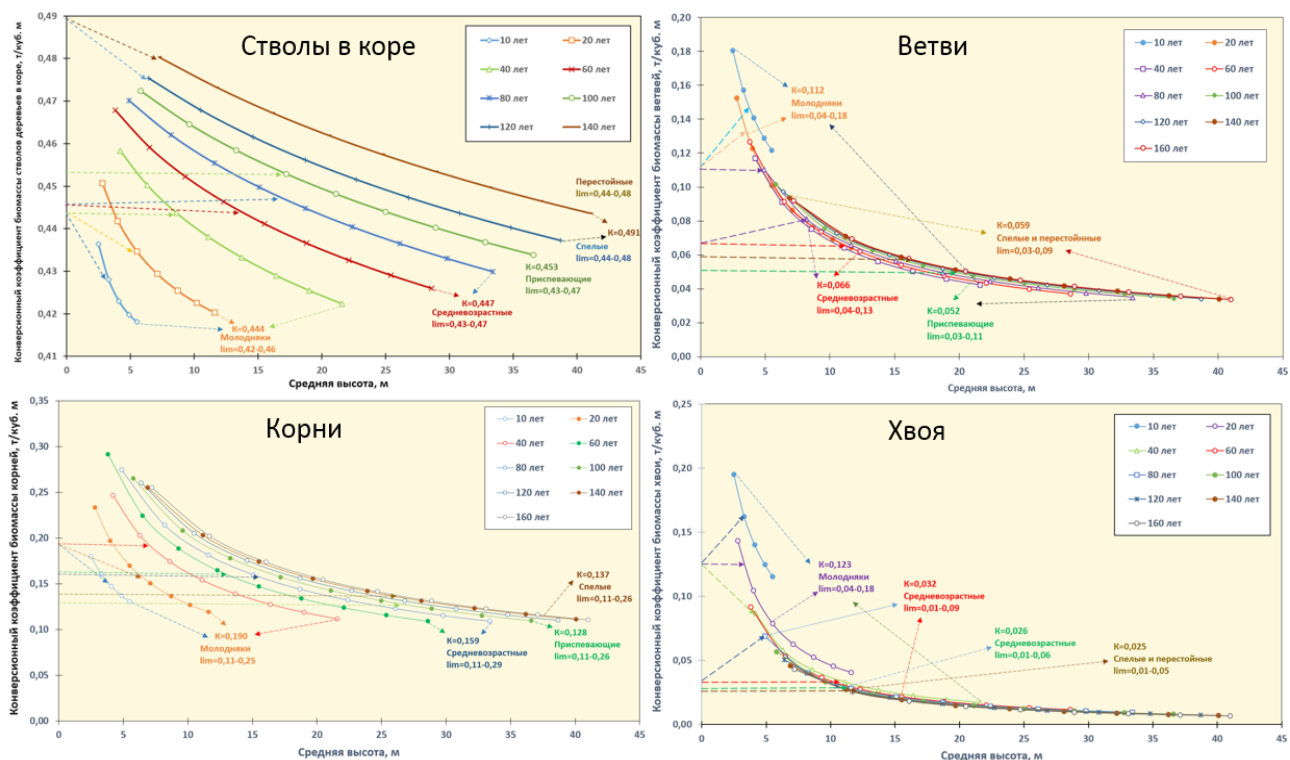


Рис. 3. Зависимости конверсионных коэффициентов фракций фитомассы со средней высотой по 20-летиям древостоев
Fig. 3. Dependences of conversion coefficients of phytomass fractions with an average height for 20 years of stands

составляет от $-5,1$ до $3,8\%$. Группа спелых и перестойных древостоев в 120-140 лет имеет предельные значения от $0,44$ до $0,48$ при усредненном коэффициенте $0,491$, что находится за рамками указанного диапазона и дает основание усомниться в достоверности этого значения.

Изменение конверсионных коэффициентов биомассы ветвей в зависимости от средней высоты в группе возраста молодняки, охватившие возраст от 10 до 40 лет, имеет предельные значения от $0,04$ до $0,18$ при усредненном значении $0,112$. В процентном отношении отклонение от средней составляет от $-64,0$ до $60,7\%$. В группе возраста средневозрастные, имеющие 60-80 лет, предельные значения коэффициентов колеблются от $0,04$ до $0,13$ при усредненном значении $0,066$. В процентном отношении отклонение от средней составляет от $-39,4$ до $97,0\%$. В группе возраста приспевающие древостои (100 лет) предельные значения охватывают диапазон коэффициентов от $0,03$ до $0,11$ при усредненном значении $0,052$. В процентном отношении отклонение от средней составляет от $-42,3$ до $111,5\%$. Группа спелых и перестойных древостоев в 120-140 лет имеет предельные значения от $0,03$ до $0,09$ при усредненном коэффициенте $0,059$. В процентном отношении отклонение от средней составляет от $-49,2$ до $52,5\%$.

Изменение конверсионных коэффициентов биомассы корней в зависимости от средней высоты в группе возраста молодняки, охватившие возраст от 10 до 40 лет, имеет предельные значения от $0,11$ до $0,25$ при усредненном значении $0,19$. В процентном отношении отклонение от средней составляет от $-42,1$ до $31,6\%$. В группе возраста средневозрастные, имеющие 60-80 лет, предельные значения коэффициентов колеблются от $0,11$ до $0,29$ при усредненном значении $0,159$. В процентном отношении отклонение от средней составляет от $-30,8$ до $82,4\%$. В группе возраста приспевающие древостои (100 лет) предельные значения охватывают диапазон коэффициентов от $0,11$ до $0,26$ при усредненном значении $0,128$. В процентном отношении отклонение от средней составляет от $-14,1$ до $103,1\%$. Группа спелых и перестойных древостоев в 120-140 лет имеет

предельные значения от $0,11$ до $0,26$ при усредненном коэффициенте $0,137$. В процентном отношении отклонение от средней составляет от $-19,7$ до $89,8\%$.

Изменение конверсионных коэффициентов биомассы хвои в зависимости от средней высоты в группе возраста молодняки, охватившие возраст от 10 до 40 лет, имеет предельные значения от $0,04$ до $0,18$ при усредненном значении $0,123$. В процентном отношении отклонение от средней составляет от $-67,5$ до $46,3\%$. В группе возраста средневозрастные, имеющие 60-80 лет, предельные значения коэффициентов колеблются от $0,01$ до $0,09$ при усредненном значении $0,032$. В процентном отношении отклонение от средней составляет от $-68,8$ до $181,3\%$. В группе возраста приспевающие древостои (100 лет) предельные значения охватывают диапазон коэффициентов от $0,01$ до $0,06$ при усредненном значении $0,026$. В процентном отношении отклонение от средней составляет от $-61,5$ до $130,8\%$. Группа спелых и перестойных древостоев в 120-140 лет имеет предельные значения от $0,01$ до $0,05$ при усредненном коэффициенте $0,025$. В процентном отношении отклонение от средней составляет от $-60,0$ до $100,0\%$.

Линии регрессии конверсионных коэффициентов коры также указывают на более широкий диапазон изменений коэффициентов от средней высоты древостоев, чем от возраста (рис. 4).

Сравнения предельных значений коэффициентов по коре не проводились, так как информация по усредненным значениям коэффициентов в таблице 1 отсутствует.

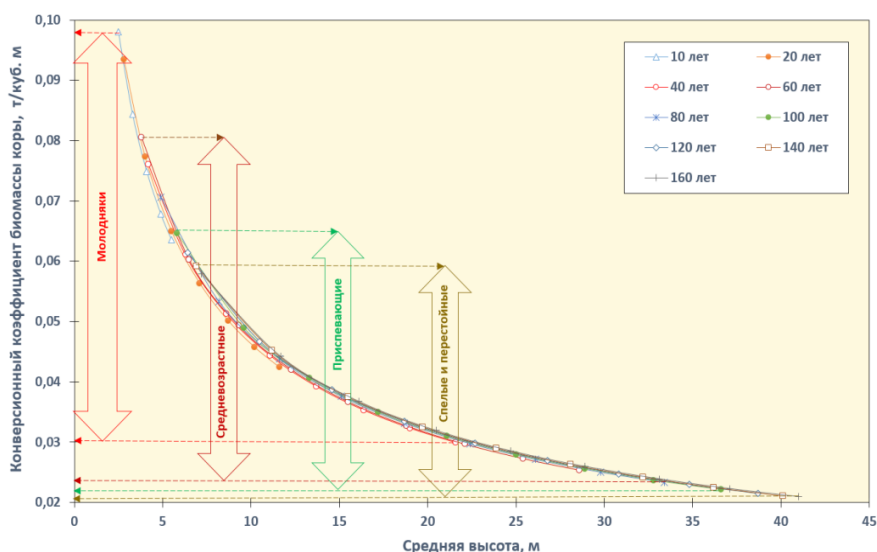


Рис. 4. Взаимосвязь конверсионных коэффициентов коры стволов деревьев со средней высотой древостоев по 20-летиям
Fig. 4. The relationship between the conversion coefficients of the bark of tree trunks and the average height of stands for 20 years periods

Выводы

Обобщая изложенное, следует отметить, что использование конверсионного подхода по группам возраста не обеспечивает требуемой точности определения коэффициентов по фракциям фитомассы. С учетом же того, что определение запаса при таксации древостоев осуществляется с ошибкой не менее $\pm 20\%$ (в соответствии с лесоустроительной инструкцией), общая ошибка

определения биомассы фракций фитомассы существенно превышает допустимые пределы.

Таким образом, достоверное определение биологической продуктивности древостоев по фракциям фитомассы может быть достигнуто только с применением регрессионных моделей конверсионных коэффициентов, с обязательным включением в качестве независимых переменных средней высоты и возраста древостоев.

Список использованных источников

1. **Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Честных О.В.** Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу основных лесобразующих пород России // Лесная таксация и лесостроительство. 2003. Вып. 1 (32). С. 119-127.
2. **Усольцев В.А.** Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 706 с.
3. **Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г. и др.** Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии: нормативно-справочные материалы. Изд. 2-е, доп. М., 2008. 886 с.
4. **Демаков Ю.П.** Структура и закономерности развития лесов Республики Марий Эл: монография. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. 432 с.
5. **Демаков Ю.П.** Использование аллометрических зависимостей для оценки фитомассы различных фракций деревьев и моделирования их динамики / Пуряев А.С., Черных В.Л., Черных Л.В. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Лес. Экология. Природопользование». 2015. № 2 (26).
6. **Хлюстов В.К.** Комплексная оценка и управление древесными ресурсами: модели-нормативы-технологии. Кн. II. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015. 449 с.
7. **Хлюстов В.К., Устинов М.М., Хлюстов Д.В.** Информационно-справочная система комплексной оценки древесных лесных ресурсов // Известия ТСХА. 2013. Вып. 2. С. 148-166.
8. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.
9. **Загребев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З. и др.** Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М.: Колос, 1992. 495 с.
10. Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов: Распоряжение Минприроды России от 30 июня 2017 г. № 20-р (ред. от 20 января 2021 г.). URL: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-minprirody-rossii-ot-30062017-n-20-r/>.

Критерии авторства

Хлюстов В.К., Ганихин А.М. выполнили теоретические и практические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.04.2023

Одобрена после рецензирования 17.05.2023

Принята к публикации 17.05.2023

References

1. **Zamolodchikov D.G.** Conversion rates of plantation stocks into phytomass of the main forest-forming species of Russia / D.G. Zamolodchikov, A.I. Utkin, O.V. Chestnykh // Forest inventory and forest management. 2003. Iss. 1 (32). S. 119-127.
2. **Usoltsev V.A.** Phytomass of forests of Northern Eurasia: database and geography. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2001. 706 p.
3. **Shvidenko A.Z.** Forest-forming species of Northern Eurasia. Normative and reference materials Tables and models of the course of growth and productivity of plantations of the main / D.G. Shchepashchenko et al. // Izd. second, add. M.: 2008, 886 p.
4. **Demakov Y.P.** Structure and patterns of development of forests of the Republic of Mari El: monograph. Yoshkar-Ola: PSTU 2018. 432 p. ISBN 978-5-8158-2014-2.
5. **Demakov Yu.P.** The use of allometric dependencies for assessing the phytomass of various fractions of trees and modeling their dynamics / Puryaev A.S., Chernykh V.L., Chernykh L.V. // Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Wildlife management. 2015. № 2 (26).
6. **Khlyustov V.K.** Integrated assessment and management of wood resources: models – standards – technologies. Book II. M.: RSAU – MAA, 2015, 449 p. <http://elib.timacad.ru/dl/full/s23052022kniga2.pdf>.
7. **Khlyustov V.K.** Information and reference system for a comprehensive assessment of wood forest resources / V.K. Khlyustov, M.M. Ustinov, D.V. Khlyustov // Proceedings of the Timiryazev Agricultural Academy. 2013. Iss. 2, P. 148-166.
8. **Draper N., Smith G.** Applied regression analysis. Moscow: Statistics, 1973. 392 p.
9. **Zagrebey V.V.** All-Union standards for forest inventory / Sukhikh V.I., Shvidenko A.Z., et al. M.: Kolos, 1992. 495 p.
10. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 30.06.2017 N20-p (edited 20.01.2021) <About approval of methodical instructions on the quantitative determination of the volume of greenhouse gas absorption <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-minprirody-rossii-ot-30062017-n-20-r/>>

Criteria of authorship

Khlyustov V.K., Ganikhin A.M. carried out theoretical and practical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Khlyustov V.K., Ganikhin A.M. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 11.04.2023

Approved after peer review 17.05.2023

Accepted for publication 17.05.2023